

Dinâmicas geomorfológicas. Metodologias. Aplicação.

Condicionantes geomorfológicas de erosão hídrica na bacia da Ribeira Seca (Santiago, Cabo Verde)

Geomorphological factors of hidric erosion in the Ribeira Seca basin (Santiago, Cape Verde)

Fernando L. Costa, M. Carmo Nunes

*Dep. Ciências Naturais, Cartografia, Instituto de Investigação Científica Tropical (IICT)
flcosta1955@gmail.com, mcarmonunes@mail.telepac.pt*

**Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos,
Volume V, APGeom, Lisboa, 2007, p. 107-120.**

Condicionantes geomorfológicas de erosão hídrica na bacia da Ribeira Seca (Santiago, Cabo Verde).

Geomorphological factors of hidric erosion in the Ribeira Seca basin (Santiago, Cape Verde).

F. L. Costa¹, M. Carmo Nunes¹

¹ Dep. Ciências Naturais, Cartografia, Instituto de Investigação Científica Tropical (IICT), flcosta1955@gmail.com, mcarmonunes@mail.telepac.pt.

Resumo: Na Ilha de Santiago, em Cabo Verde, os processos de erosão hídrica são os mais activos, e afectam áreas extensas sendo os responsáveis pelos riscos naturais mais graves, devido, fundamentalmente, às condições de erosividade das precipitações e de erodibilidade das vertentes. As suas principais condicionantes geomorfológicas são os declives e a grande variabilidade do perfil e do traçado das vertentes, a que se associa a erodibilidade das diferentes unidades litológicas ou dos materiais de cobertura. O objectivo deste trabalho é obter um mapa de susceptibilidade geomorfológica para a bacia da Ribeira Seca (Cabo Verde) com base no modelo digital do terreno (MDT) e no mapa geológico. Foi desenvolvido um modelo em Sistema de Informação Geográfica (SIG) e obtidos os mapas de declive, do perfil e do traçado das vertentes recorrendo a um classificador *fuzzy*. Do cruzamento destes mapas foi possível criar um mapa de susceptibilidade geomorfológica classificado em três classes de susceptibilidade.

Palavras-chave: Processos de erosão hídrica, susceptibilidade geomorfológica, formas de relevo, SIG, Cabo Verde.

Abstract: The hidric erosion processes are considered the most widespread and active in Santiago Island, Cape Verde. They are responsible by the main natural hazard, due to great erosivity of rainstorms episodes and to the slope erodibility conditions. The main geomorphological factors of hidric erosion hazards are the slopes steepness and the great variability of the profile and tangential curvatures combined with the erodibility of the lithological units or the soil cover formations. The goal of this study is to produce a geomorphologic susceptibility map for Ribeira Seca basin based on topography (Digital Elevation Model – DEM) and in the geological map. A basic model was produced in a Geographical Information System (GIS) from were obtained the slope, the profile and tangential maps based on *fuzzy* classification. The geomorphologic susceptibility map was produced from overlaying slope, profile, tangential and geologic maps. This map was reclassified in three classes of susceptibility (low, intermediate, and high).

Keywords: Hidric erosion processes, geomorphologic susceptibility, landforms, SIG, Cape Verde.

1. INTRODUÇÃO

A bacia da Ribeira Seca é a mais extensa de Santiago e desenvolve-se na sua vertente oriental e mais húmida, entre o Maciço do Pico da Antónia, o mais elevado da ilha (1 350 m), e a costa leste, na região de Pedra Badejo (Fig. 1). Trata-se de uma das bacias mais importantes dos pontos de vista económico e social, pelo seu carácter eminentemente agrícola, onde se observam contrastes espaciais nas condições geomorfológicas, litológicas, hidrográficas, climáticas e da cobertura vegetal. Integra-se em três das unidades geomorfológicas da ilha de Santiago (Costa, 2002). O Maciço do Pico da Antónia, a oeste, onde se centram as cabeceiras, desenvolve-se em assentadas alternadas de mantos lávicos e piroclásticos de basalto. Tem altitudes superiores a 400 m, interflúvios alongados e muito inclinados, vertentes com perfil e traçado rectilíneos predominantes e com declives frequentemente superiores a 35 %.

A unidade de relevo dos Cutelos, do interior centro e sudeste, talha conglomerados e brechas sedimentares, com elementos de natureza basáltica, com graus de coerência e compacidade variados e com tendência para a arenização superficial. Caracteriza-se por ter altitudes de 200 a 400 m, topos convexos, alongados, estreitos e inclinados e vertentes de perfil e de traçado rectilíneos, com declives frequentemente acima dos 20 %.

As Achadas do sector nordeste, abaixo dos 200 m de altitude, correspondem a planaltos sub-estruturais, com topos limitados por cornijas de basalto e vertentes regularizadas por cascalheiras, com declives que suavizam para a base, perfis rectilíneo-côncavos e traçados rectilíneos predominantes.

A grande diversidade das formas de relevo, os declives acentuados das vertentes e a instabilidade acentuada do solo, pelo seu remeximento antrópico para fins agrícolas, permitem uma dinâmica das vertentes muito activa, acentuada pelas condições de clima semi-árido.

Os tipos de processos erosivos predominantes em cada unidade de relevo dependem das suas condições de erodibilidade, profundamente relacionadas com a morfologia e a litologia (Costa, 1996 e 2002).

Os processos erosivos resultantes da acção da gravidade, típicos da longa estação seca, afectam sectores bem definidos pelas condições lito-estruturais locais das rochas do substracto. Neles se incluem os desabamentos que afectam essencialmente vertentes talhadas em basaltos fragmentados e/ou com rebordos rochosos, casos das Achadas orientais ou do Maciço do Pico da Antónia (Costa, 2006). Neles se integram também as escoadas que ocorrem a seco, mais frequentemente na unidade de Cutelos.

Os processos erosivos sob a acção do escoamento ocorrem no período húmido, quando a intensa actividade agrícola torna o solo mais vulnerável (Costa & Raposo, 2005). Afectam de forma generalizada todas as unidades de relevo, embora se acentuem nos Cutelos, onde se formam os sulcos e as ravinas mais extensos, largos e profundos e com uma maior densidade. Nesta mesma unidade existem os testemunhos mais marcados do escoamento elementar em toalha, como a lavagem superficial de elementos finos, evidenciado pelo rebaixamento topográfico, bem como do escoamento organizado, com o entalhe particularmente activo de valeiros (Costa, 2004). Nas Achadas são comuns os ravinamentos, sendo pouco marcados os processos de sulcagem e lavagem de elementos finos, devido à frequente cobertura por cascalheiras (Costa, 2002).

2. FORMAS DE RELEVO E PROCESSOS DE EROSIÃO HÍDRICA

Os processos relacionados com a acção da escorrência em vertentes na bacia da Ribeira Seca são os mais activos e afectam áreas extensas, apesar dos episódios chuvosos só ocorrerem em 10 % dos dias dos três meses da estação húmida. A erosão hídrica é, assim, responsável pelos riscos naturais mais gravosos, em grande medida, condicionada pelo carácter concentrado e intenso das precipitações e pelas condições geomorfológicas contrastadas.

Na realidade admite-se que, em face dos declives acentuados, a acção do escoamento desempenha o papel mais importante no balanço final da erosão (Haagsma, 1990). A perda de solo pode ser constatada pelo elevado caudal sólido que as linhas de água transportam na sequência de chuvadas. Estas observações estiveram na base das avaliações empíricas de perda de solos efectuadas em bacias hidrográficas, dos registos de caudal sólido e das medições em parcelas experimentais, a maioria das quais na bacia e sub-bacias da Ribeira Seca.

A unidade de relevo dos Cutelos, do interior centro e sudeste, talha conglomerados e brechas sedimentares, com elementos de natureza basáltica, com graus de coerência e compacidade variados e com tendência para a arenização superficial. Caracteriza-se por ter altitudes de 200 a 400 m, topos convexos, alongados, estreitos e inclinados e vertentes de perfil e de traçado rectilíneos, com declives frequentemente acima dos 20 %.

As Achadas do sector nordeste, abaixo dos 200 m de altitude, correspondem a planaltos sub-estruturais, com topos limitados por cornijas de basalto e vertentes regularizadas por cascalheiras, com declives que suavizam para a base, perfis rectilíneo-côncavos e traçados rectilíneos predominantes.

A grande diversidade das formas de relevo, os declives acentuados das vertentes e a instabilidade acentuada do solo, pelo seu remeximento antrópico para fins agrícolas, permitem uma dinâmica das vertentes muito activa, acentuada pelas condições de clima semi-árido.

Os tipos de processos erosivos predominantes em cada unidade de relevo dependem das suas condições de erodibilidade, profundamente relacionadas com a morfologia e a litologia (Costa, 1996 e 2002).

Os processos erosivos resultantes da acção da gravidade, típicos da longa estação seca, afectam sectores bem definidos pelas condições lito-estruturais locais das rochas do substracto. Neles se incluem os desabamentos que afectam essencialmente vertentes talhadas em basaltos fragmentados e/ou com rebordos rochosos, casos das Achadas orientais ou do Maciço do Pico da Antónia (Costa, 2006). Neles se integram também as escoadas que ocorrem a seco, mais frequentemente na unidade de Cutelos.

Os processos erosivos sob a acção do escoamento ocorrem no período húmido, quando a intensa actividade agrícola torna o solo mais vulnerável (Costa & Raposo, 2005). Afectam de forma generalizada todas as unidades de relevo, embora se acentuem nos Cutelos, onde se formam os sulcos e as ravinas mais extensos, largos e profundos e com uma maior densidade. Nesta mesma unidade existem os testemunhos mais marcados do escoamento elementar em toalha, como a lavagem superficial de elementos finos, evidenciado pelo rebaixamento topográfico, bem como do escoamento organizado, com o entalhe particularmente activo de valeiros (Costa, 2004). Nas Achadas são comuns os ravinamentos, sendo pouco marcados os processos de sulcagem e lavagem de elementos finos, devido à frequente cobertura por cascalheiras (Costa, 2002).

2. FORMAS DE RELEVO E PROCESSOS DE EROSIÃO HÍDRICA

Os processos relacionados com a acção da escorrência em vertentes na bacia da Ribeira Seca são os mais activos e afectam áreas extensas, apesar dos episódios chuvosos só ocorrerem em 10 % dos dias dos três meses da estação húmida. A erosão hídrica é, assim, responsável pelos riscos naturais mais gravosos, em grande medida, condicionada pelo carácter concentrado e intenso das precipitações e pelas condições geomorfológicas contrastadas.

Na realidade admite-se que, em face dos declives acentuados, a acção do escoamento desempenha o papel mais importante no balanço final da erosão (Haagsma, 1990). A perda de solo pode ser constatada pelo elevado caudal sólido que as linhas de água transportam na sequência de chuvadas. Estas observações estiveram na base das avaliações empíricas de perda de solos efectuadas em bacias hidrográficas, dos registos de caudal sólido e das medições em parcelas experimentais, a maioria das quais na bacia e sub-bacias da Ribeira Seca.

Os valores de perda de solo obtidos por avaliações empíricas (Faurès & Morais 1988; Marques, 1984) para bacias afluentes da Ribeira Seca foram muito superiores aos registos de carga sólida efectuados nos seus próprios colectores (Faurès & Morais 1988). As taxas de sedimentação em diques transversais (Sabino, 1992) ou o total de detritos erodidos em bacias experimentais foram muito inferiores aos das medições locais de cargas sólidas médias transportadas pelos cursos de água (Faurès & Morais 1988).

As medições em parcelas experimentais revelaram uma grande variação em função dos anos e dos tipos de ocupação do solo. Os máximos nelas registados foram, no geral, superiores aos das cargas sólidas observadas em cursos de água e, em média, um pouco superiores aos observados em diques nos fundos de vale. Na realidade estas parcelas foram implantadas próximo do topo pelo que os resultados obtidos não permitiram avaliar as condições de sedimentação/erosão nos vários sectores da vertente, nomeadamente a acumulação testemunhada pela concavidade basal dos seus perfis.

As avaliações de perda de solo foram pensadas para estudar a variabilidade temporal e a erosão em função de alguns tipos ocupação do solo, ou apenas para ter uma aproximação empírica aos totais de erosão em causa, não avançaram muito quanto aos processos responsáveis pela erosão, nem avaliaram a sua extensão, intensidade e densidade. Pouco adiantaram sobre a quantificação da erosividade da precipitação ou no escoamento superficial que permitem o desencadeamento e desenvolvimento daqueles processos. Não estabeleceram a ponderação relativa aos factores de erodibilidade na perda de solo, como sejam as condicionantes geomorfológicas, a posição na vertente, a morfologia, a morfometria ou a litologia.

Os estudos de geomorfologia realizados na bacia da Ribeira Seca, baseados em levantamentos detalhados de campo, tentaram colmatar algumas destas lacunas. Visaram avaliar as condicionantes geomorfológicas responsáveis pelo desencadeamento de processos de erosão hídrica, como a variabilidade das formas de relevo, os declives, o perfil e o traçado das vertentes e a diferente erodibilidade das unidades litológicas ou dos materiais de cobertura.

O declive foi considerado, pela maioria dos autores que estudaram a bacia da Ribeira Seca, como um dos factores de erosão hídrica mais relevantes. Verificou-se que nos sectores das vertentes com declive muito acentuado não se encontravam vestígios de erosão hídrica, contrariamente aos que se observava em troços mais suaves, a meia vertente ou mais próximos dos fundos de vale. Nos topos das vertentes mais desnudados ocorria alguma erosão hídrica, que se acentua imediatamente abaixo sob a acção do escoamento superficial em toalha e linear (Roose, 1994; Barry *et al*, 1995). Na realidade, em declives superiores a 70 % não se verificaram sinais de erosão hídrica, no entanto, em condições de declives mais suaves, os sulcos surgiam em grande número e com maior extensão nos sectores de declive entre 25 e 70 %. As ravinas foram observadas em sectores com declives de 10 a 30 %, ou simplesmente por coalescência de sulcos, para a base das vertentes (Roose, 1994; Barry *et al*, 1995). Na bacia da Ribeira Seca o rebaixamento topográfico foi registado, sobretudo, em sectores próximos dos topos das vertentes e a sulcagem a meia vertente, (Costa, 2002 e 2004), ambos em condições de declive superiores a 20 %, e as ravinas para a base das vertentes, por acumulação e aumento do escoamento, e em troços com declives mais suaves.

O perfil das vertentes foi igualmente considerado como uma das condicionantes de erosão hídrica mais relevantes na bacia da Ribeira Seca. Nas vertentes de perfil rectilíneo, com maior representação na área,

verificou-se uma intensa erosão hídrica, induzida pelo remeximento agrícola (Barry *et al*, 1995). Nestes sectores das vertentes de perfil rectilíneo, os sulcos são a forma de erosão que atinge uma maior densidade, extensão, largura e profundidade em áreas de declives regulares, nas cabeceiras dos valeiros (Costa, 2004). Nestas condições de perfil e com material friável de cobertura, a acção do escoamento originou as maiores perdas de solo (Bertrand, 1994). A formação dos sulcos verificou-se, normalmente, a meia vertente e próximo dos topos convexos. Nos sectores de perfil côncavo com mais de 50 m, registou-se uma concentração da drenagem tal que os sulcos evoluíam rapidamente em ravinas (Bertrand, 1994). Nestas áreas que se encontram sobretudo a meia vertente e para a base, em declives mais suaves, desenvolvem-se com maior frequência ravinas (Costa, 2004).

O traçado das vertentes foi considerado, como uma das condicionantes de erosão hídrica, apenas por um autor (Costa, 2002 e 2004), em resultado de observações detalhadas de campo. Os sulcos são a forma de erosão que atinge uma maior densidade, extensão, largura e profundidade em sectores das vertentes de traçado côncavo. As ravinas têm maior densidade em sectores de traçado rectilíneo e atingem maior dimensão em áreas de traçado côncavo.

No conjunto da bacia as vertentes complexas são mais sujeitas à erosão hídrica, conforme se tinha constatado no sector meridional de Santiago (Wit, 1986), sendo os sectores das vertentes mais afectados, os de perfil rectilíneo e traçado côncavo, onde predominam o rebaixamento topográfico e a sulcagem, logo seguidos dos de perfil e traçado convexo e por fim os de perfil côncavo e traçado rectilíneo, onde é mais frequente o ravinamento.

Os aspectos litológicos foram referidos pelos autores que estudaram a região como um dos factores igualmente marcantes de erodibilidade das vertentes. O rebaixamento topográfico, resultante do escoamento elementar em toalha ou laminar difuso foi observado em vertentes com declive superior a 30 % e com um elevado teor de material granular de cobertura, e é pouco visível nas áreas cobertas por cascalheiras de vertentes (Costa, 2002). Os sulcos eram mais comuns em vertentes talhadas em materiais friáveis, com texturas granulares a finas, como os conglomerados e brechas da unidade geomorfológica dos Cutelos, alguns piroclastos e depósitos fluviais. As ravinas eram mais frequentes no contexto das mesmas unidades geológicas e de relevo dos sulcos e também em vertentes onde afloram lavas em almofada e em sectores cobertos por cascalheiras de vertente na unidade de Achadas (Costa, 2002).

Os critérios estabelecidos por estes autores, serviram de base para a criação do modelo de erodibilidade, para a bacia da Ribeira Seca, desenvolvido no presente estudo, recorrendo aos mapas das formas de vertente (perfil e traçado), que foram obtidos automaticamente, e aos mapas de declives e geológico.

3. METODOLOGIA E RESULTADOS

Diferentes abordagens para gerar as formas do relevo a partir de modelos digitais do terreno (MDT), têm vindo a ser desenvolvidas desde os anos 90, recorrendo simplesmente à informação tri-dimensional, a mapas de declives, à análise do perfil das vertentes ou ainda a combinações do declive com a exposição e a altitude (Dymond & Harmsworth, 1994; Dymond *et al*, 1995). Estes algoritmos baseiam-se numa classificação arbitrária, que depende da escala de trabalho, e que só tem em conta as características locais da superfície terrestre, e não do conceito de vizinhança, nem o contexto de paisagem, nem a

rugosidade da superfície. Mais recentemente, com base em modelos probabilísticos, têm vindo a ser desenvolvidos outros mais complexos, nomeadamente modelos *fuzzy* (Schmidt & Hewitt, 2003), em que cada pixel é classificado em função do grau de pertença a determinada classe, estando-lhe associado um valor de incerteza (*fuzziness*).

As formas do relevo, que influenciam o escoamento e consequentemente a erosão hídrica, que foram tidas em consideração neste estudo, são o declive, o perfil e o traçado das vertentes. O perfil (definido no plano da linha de maior declive) afecta a velocidade de escoamento influenciando consequentemente a intensidade da erosão. O traçado (no plano perpendicular à linha de maior declive) é responsável pela convergência ou divergência do escoamento (Moore *et al*, 1991).

Os mapas de perfil e de traçado das vertentes foram produzidos por algoritmos de classificação *fuzzy* aplicados às formas de relevo e desenvolvidos por Schmidt & Hewitt (Schmidt & Hewitt, 2003). Esta abordagem é baseada na geometria local da superfície terrestre, mas em que as formas do relevo são avaliadas no contexto da paisagem, ou seja entrando em linha de conta com o conceito de vizinhança.

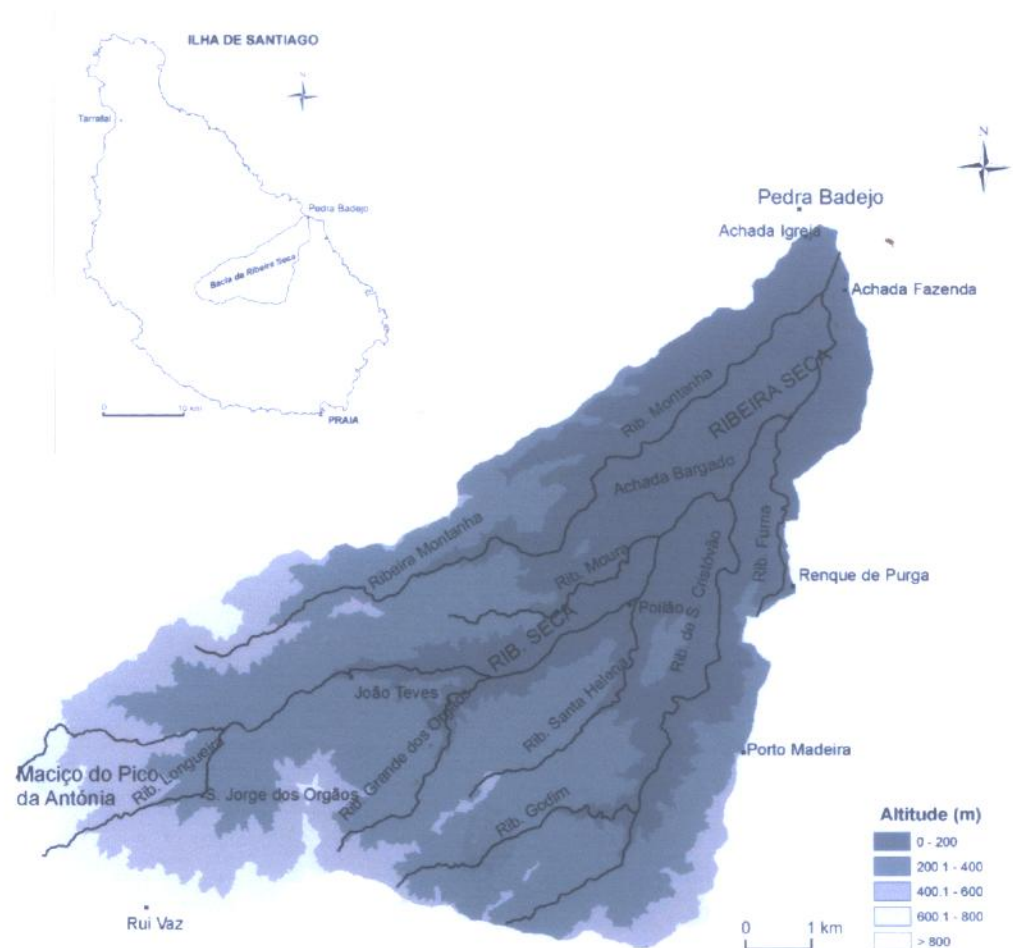


Figura 1 – Bacia da Ribeira Seca, Santiago.

Figure 1 – Ribeira Seca basin, Santiago.

A metodologia aplicada neste trabalho consistiu na criação de um modelo SIG, semi-empírico de avaliação qualitativa do grau de erodibilidade, à escala local. Este modelo é baseado no cruzamento dos mapas de declives, de perfil e do traçado das vertentes e do mapa geológico, tendo em conta que são estas as principais condicionantes de erosão hídrica, referidas pelos autores que estudaram esta região (Roose, 1994; Barry *et al*, 1995; Costa 2002). Cada um destes mapas foi reclassificado com base numa análise qualitativa, sendo atribuído um número de ordem a cada classe, em função da sua susceptibilidade à erosão hídrica, cujo valor mais baixo (1) foi dado à classe de menor susceptibilidade e o mais elevado (3) à mais susceptível, conforme foi localmente reconhecido, nomeadamente com base em informação de campo (Costa, 2002).

O modelo de erodibilidade foi desenvolvido tendo como dados de partida o MDT, que foi criado a partir da altimetria do mapa topográfico à escala 1:25 000 (SCE, 1972), com curvas de nível com uma equidistância natural de 10 metros. Foi criado o modelo de rede de triângulos (TIN), do qual se obteve o modelo em grelha (MDT), com uma resolução espacial de 15 metros.

Foi delimitada a bacia hidrográfica com base no MDT, recorrendo ao *software* ARC/INFO e utilizando as funções de direcção de escoamento e de fluxo de drenagem acumulado (Jenson & Domingue, 1988).

O gradiente, a partir do qual se obtém o mapa de declives e a curvatura (perfil e traçado) das vertentes, são os principais derivados do relevo, que descrevem, localmente, a forma geométrica da superfície terrestre. Estes derivados são muito dependentes da escala de análise, pelo que foram efectuados alguns testes para averiguar qual a melhor escala para produzir um modelo mais conveniente para a bacia da Ribeira Seca. Verificou-se ser mais adequado trabalhar com uma janela de 3x3 pixels, tendo o pixel tem uma resolução espacial de 15 metros.

Os mapas de declives e das curvaturas (perfil e traçado) foram obtidos também a partir do MDT, pelo método de interpolação de Evans (Evans, 1980), baseado em funções polinomiais quadráticas e num ajustamento por mínimos quadrados, e recorrendo também a algoritmos de classificação *fuzzy* das formas do relevo (Schmidt & Hewitt, 2003; Schmidt *et al*, 2003).

Os limites das classes de declives foram estabelecidos tendo por base os limiares que marcam as condições de escoamento/retenção de águas superficiais e de desencadeamento de processos de erosão hídrica (Fig. 2; Quadro 1).

As condições de escoamento e, conseqüentemente, de erosão hídrica variam em função do declive, pelo que a cada classe de declive foi atribuído um número de ordem, tanto mais elevado quanto maiores são as suas condições de susceptibilidade à erosão.

Desta forma sob declives entre 20 % e 35 %, as condições de escoamento muito fácil e concentrado permitem a formação de sulcos e ravinas, e verifica-se uma perda de solo considerada muito acentuada, pelo que lhe foi atribuído o número de ordem mais elevado (3). Em declives entre 10 % a 20 % o escoamento é fácil com a formação de ravinas e raros sulcos, e entre 35 a 70 % desenvolvem-se sulcos frequentes, pelo que foi dado a ambas as classes o número de ordem médio (2). Sob declives de 2 % a 10 % e superiores a 70 % existem condições que levam a uma erosão pouco intensa, no primeiro caso, por o escoamento ser lento e, no segundo, muito rápido, pelo que lhes foi atribuído o número de ordem mais baixo (1).

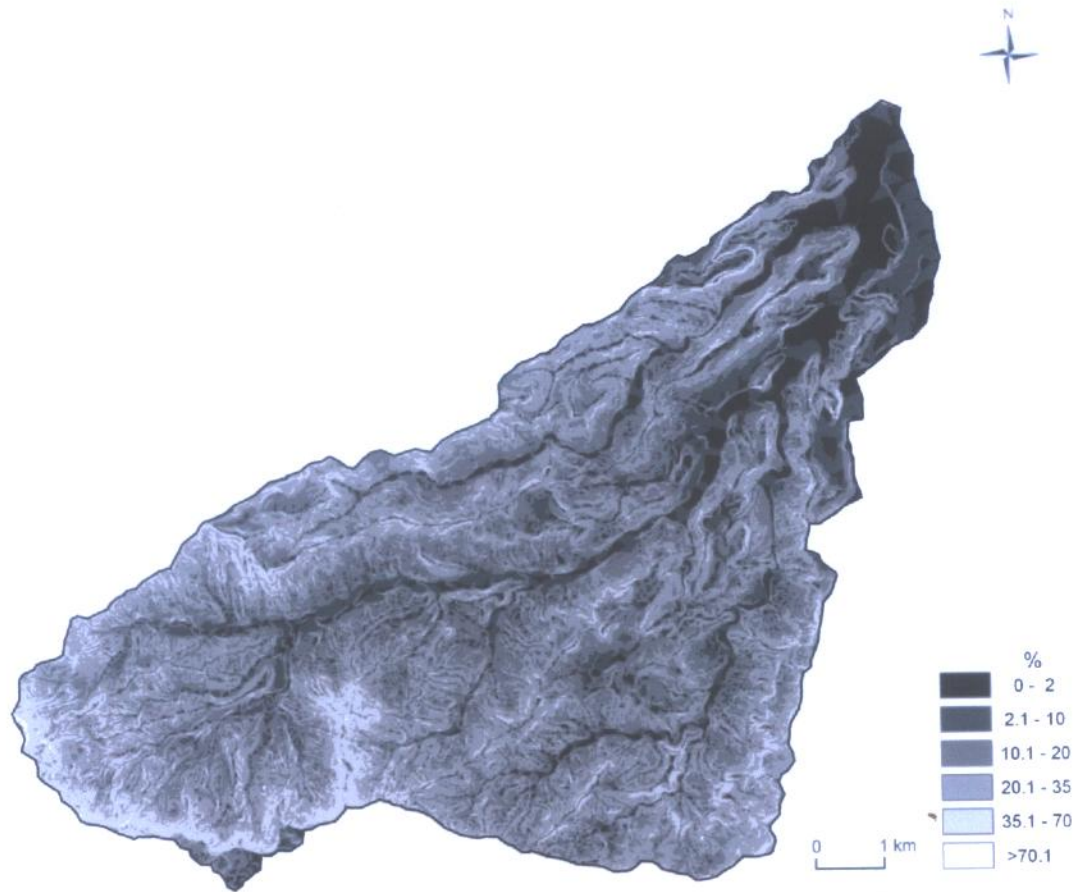


Figura 2 – Declives da bacia da Ribeira Seca.

Figure 2 – Slopes of Ribeira Seca basin.

Quadro 1

Classes de declives, área da bacia ocupada, número de ordem, escoamento superficial e processos de erosão hídrica.

Table 1

Slope classes, corresponding basin areas, rank order, surface water flow, hidric erosion processes.

Declives (%)	% Área da bacia	Número de ordem	Escoamento superficial	Processos de erosão hídrica
≤ 2	6,8	0	Vestígios de escoamento	-
]2 - 10]	13,2	1	Escoamento lento/escorrência difusa elementar	Erosão em toalha
]10 - 20]	32,1	2	Escoamento fácil/escoamento concentrado	Ravinamento
]20 - 35]	39,4	3	Escoamento muito fácil/escoamento concentrado	Sulcagem e ravinamento
]35 - 70]	8,4	2	Escoamento rápido/escoamento concentrado	Sulcagem intensa
> 70	0,001	1	Escoamento muito rápido	Ausência de erosão hídrica

Mais de 70 % da superfície da bacia tem declives entre os 10 % e 35 % (Quadro 1), ou seja tem escoamento fácil e com tendência a ser concentrado, nomeadamente acima dos 20 %, e as condições de drenagem são particularmente boas. Correspondem, assim a áreas com erosão hídrica mais intensa, em que predominam os processos de ravinamento abaixo dos 20 % de declive e de sulcagem, acima daquele valor.

As atribuições de perfil ou de traçado rectilíneo, côncavo e convexo foram definidas com base nos quantis, em três classes de igual frequência de distribuição, que presidiram à elaboração dos respectivos mapas (Fig. 3 e 4).

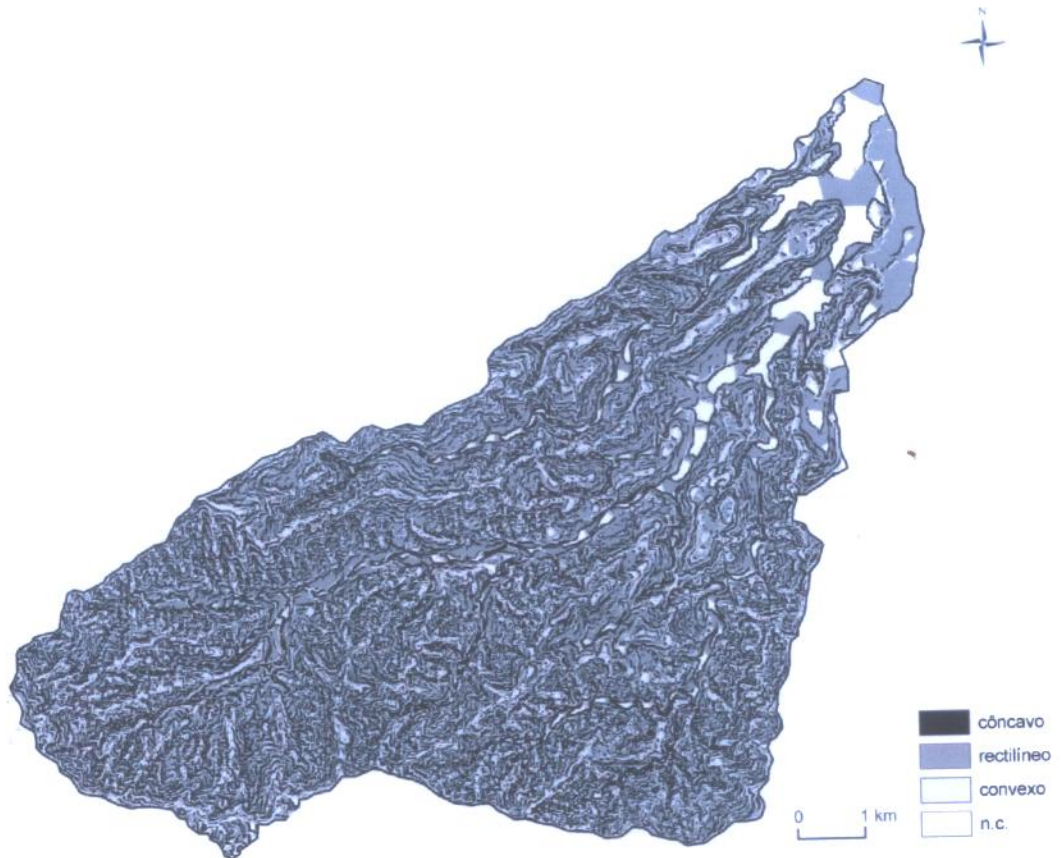


Figura 3 – Perfil das vertentes na bacia da Ribeira Seca.

Figure 3 – Profile curvature in Ribeira Seca basin.

A cada classe de perfil e traçado foi atribuída um número de ordem tanto mais elevado quanto maior a susceptibilidade à erosão hídrica definida para a região (Roose, 1994; Barry *et al*, 1995; Costa 2002). Os sectores das vertentes de perfil rectilíneo bem como os de traçado côncavo são os que apresentam maior susceptibilidade, pelo que lhes foi atribuído o número de ordem 3 (Quadro 2). Os de perfil côncavo e traçado rectilíneo são os de menor susceptibilidade, a que foi dado o número ordem 1, e os de perfil e traçado convexos têm uma susceptibilidade intermédia e foi-lhes atribuído o número de ordem 2 (Quadro 2).

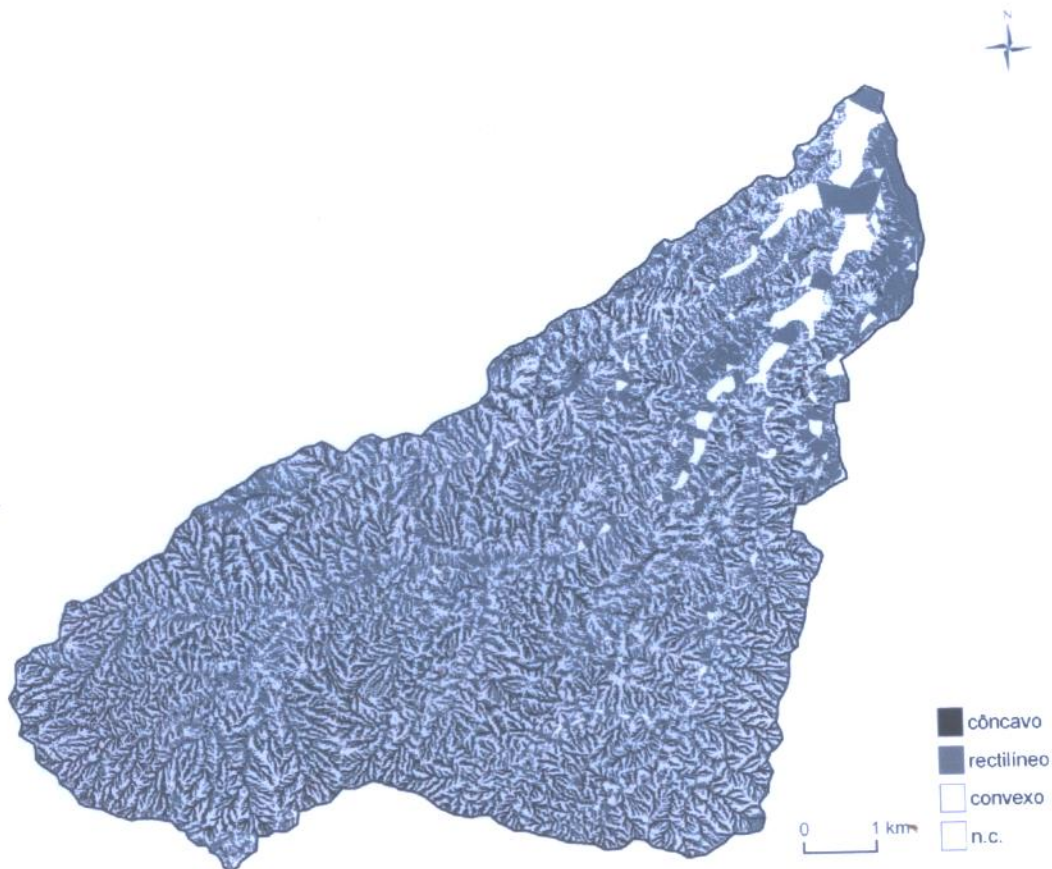


Figura 4 – Traçado das vertentes na bacia da Ribeira Seca.

Figure 4 – Tangential curvature in Ribeira Seca basin.

Quadro 2

Valores atribuídos ao perfil e ao traçado por tipos de vertente.

Table 2

Values allocated to profile and tangential curvatures by hillslope type.

Tipo de vertente	Número de ordem	
	Perfil	Traçado
Côncava	1	3
Rectilínea	3	1
Convexa	2	2

No conjunto da bacia regista-se uma grande variabilidade espacial do perfil e do traçado (Fig. 3 e 4), sendo predominantes as vertentes de perfil rectilíneo, respectivamente de 40 % e 38 % e de traçado rectilíneo e convexo, de 46 % e 39 % (Fig. 5).

O mapa geológico foi obtido em estrutura vectorial com base na cartografia geológica da Ilha de Santiago, à escala 1:25 000 (JIU/IICT, 1975), tendo sido convertido para uma estrutura matricial. Este mapa foi reclassificado de forma a agregar classes com a mesma erodibilidade (Fig. 6), e atribuído um número de ordem de grau 1 (baixo) a 3 (elevado) (Quadro 3).

Quadro 3
Formações geológicas, número de ordem e área da bacia correspondente.

Table 3
Geological formations, rank order values, and corresponding basin areas.

Formações geológicas	Número de ordem	Área da bacia (%)
Formações sedimentares plio-quadernárias: areias, conglomerados, duna fóssil, aluviões, calcários fossilíferos. Mantos lávicos e assentadas de piroclastos (Complexo Eruptivo do Pico da Antónia).	1	50
Formações eruptivas: tufo-brecha, piroclastos, mantos submarinos. Cascalheiras, depósitos de vertente.	2	14
Depósitos conglomerático-brechóides (Formação dos Orgãos), calcarenitos fossilíferos, cones de piroclastos e escórias.	3	36

As formações consideradas de maior grau de erodibilidade (3) foram os depósitos conglomerático-brechóides de elementos de natureza basáltica, que sofrem uma frequente arenização superficial e que são afectados de uma forma muito generalizada por processos de erosão hídrica. Às assentadas lávicas submarinas, bem como aos depósitos de vertente foi atribuída uma erodibilidade média (2) e às restantes formações sedimentares plio-quadernárias e aos mantos lávicos de Complexo Eruptivo do Pico da Antónia uma erodibilidade baixa (1).

Como resultado do somatório em *rank* dos mapas reclassificados relativos aos declives, ao perfil, ao traçado e à geologia, foi obtido um mapa de susceptibilidade à erosão hídrica, em função da morfologia e da litologia, com valores de dois a doze, que posteriormente foi sujeito a uma reclassificação para três classes de susceptibilidade (baixa, média e elevada) (Fig. 7), definidas com base nos quantis, ou seja com igual frequência.

No conjunto apenas 19 % da área da bacia tem uma susceptibilidade à erosão hídrica elevada, 50 % média e 31 % baixa (Fig. 8).

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Numa bacia em que os declives predominantes se encontram acima de 10 % era previsível que a erodibilidade fosse elevada, no entanto, como as condicionantes traçado das vertentes e geologia atenuam esse factor, apenas 20 % da sua área pode ser considerada como tal. Na realidade, se se atendessem apenas aos valores dos declives cerca de 39 % da bacia teria uma erodibilidade elevada (entre 20 % a 35 % de declive) e 40 % média (Quadro 1).

As áreas de perfil rectilíneo, as de maior erodibilidade, correspondem a 40 % da bacia (Fig. 5). Os sectores da vertente com traçado côncavo, os de maior susceptibilidade à erosão hídrica representam apenas 15 % da bacia (Fig. 5).

As unidades geológicas de menos erodibilidade ocupam 50 % da bacia e as classificadas como médias representam 14 % (Quadro 3).

No conjunto a bacia apresenta grandes áreas de declives e de perfis de elevada erodibilidade potencial, cerca de 40 % em cada, o mesmo sucedendo com a litologia que representa 36 % da sua superfície. Pelo contrário, as áreas de maior erodibilidade, em função do traçado, correspondem a 15 % da área.

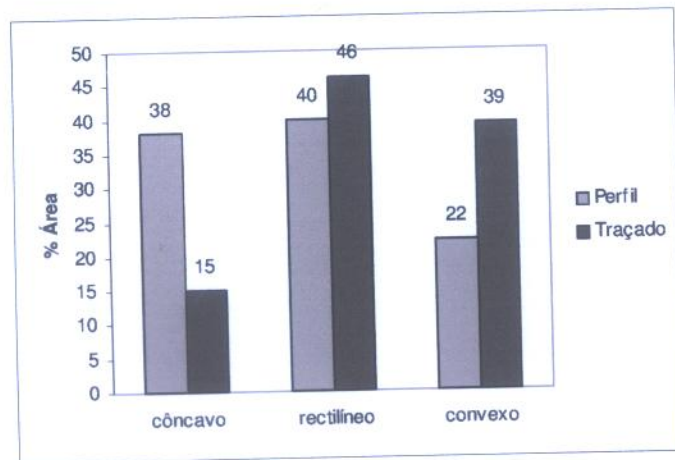


Figura 5 – Área da bacia ocupada por cada classe de perfil e de traçado.
Figure 5 – Profile and tangential curvature areas.

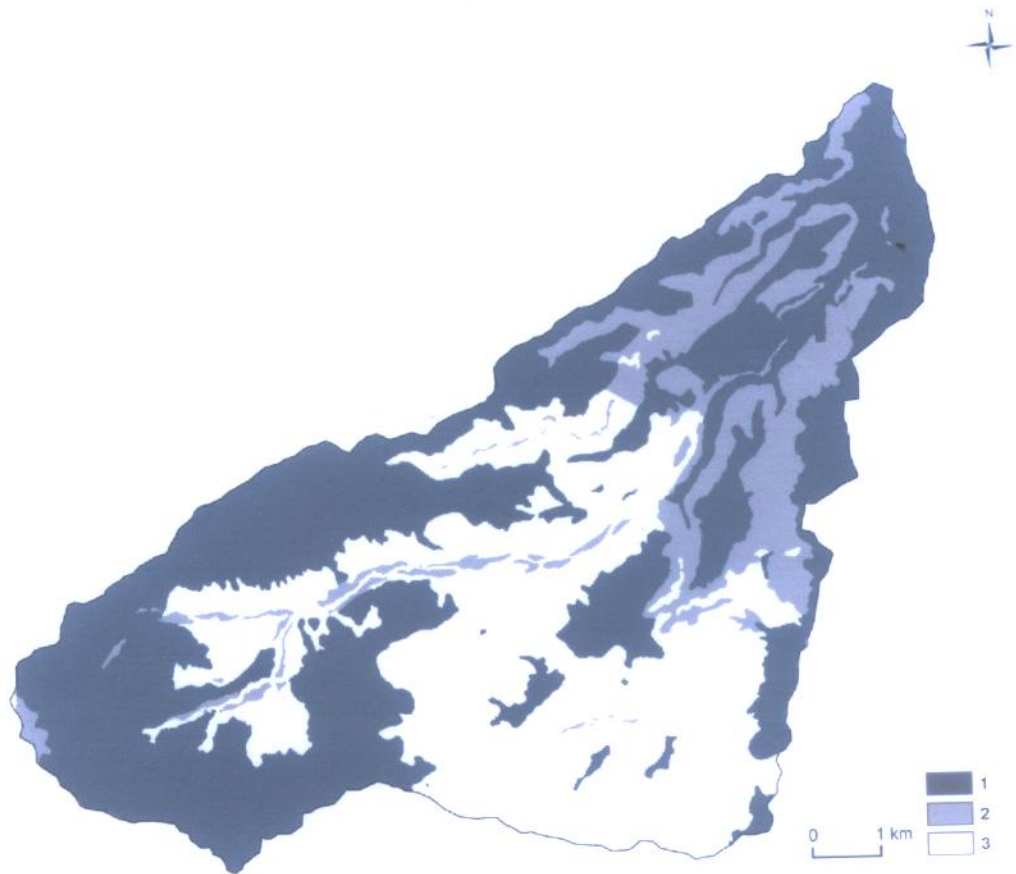


Figura 6 – Erodibilidade relativa das unidades geológicas: 1 – baixa; 2 – média; 3 – elevada.
Figure 6 – Relative erodibility of geological units: 1 – low; 2 – intermediate; 3 – high.

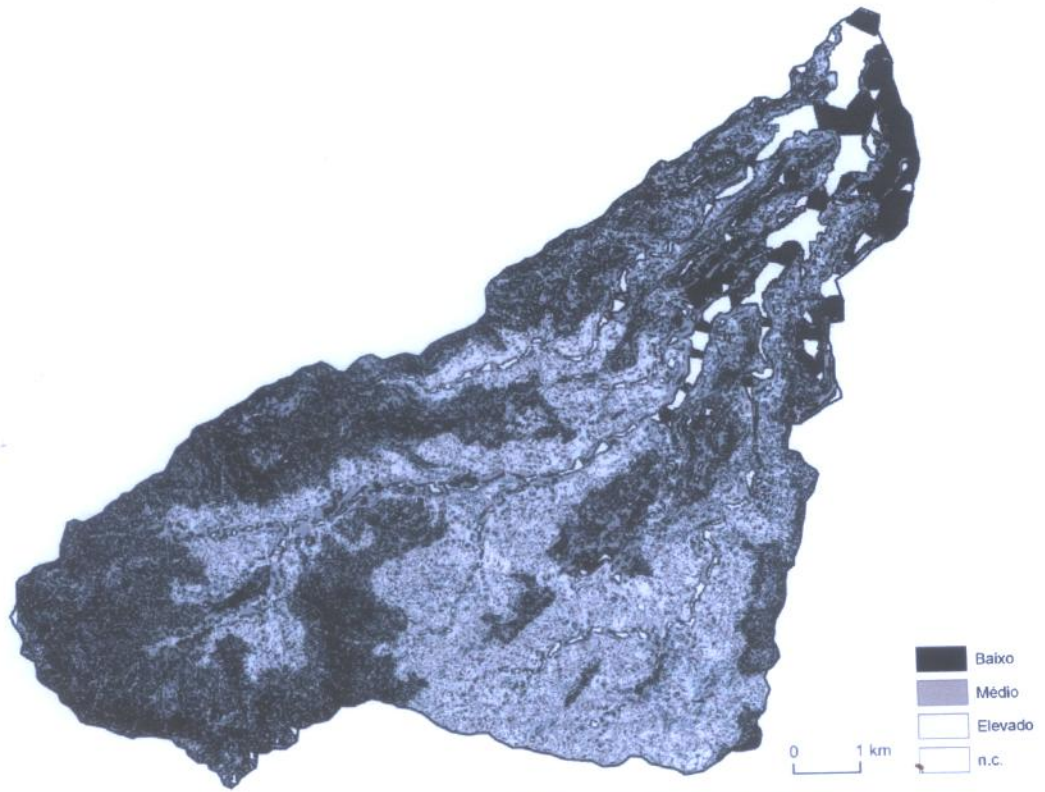


Figura 7 – Susceptibilidade à erosão hídrica na bacia da Ribeira Seca.
Figure 7 – Hydric erosion susceptibility in Ribeira Seca basin.

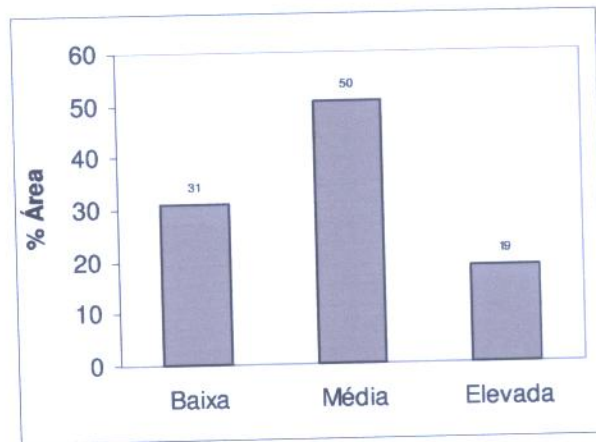


Figura 8 – Área ocupada por cada classe de susceptibilidade à erosão hídrica na bacia da Ribeira Seca.
Figure 8 – Hydric erosion susceptibility area of each classe in Ribeira Seca basin.

Como nem sempre as áreas de maior erodibilidade de todos os parâmetros são coincidentes para uma mesma área, cerca de metade da superfície da bacia tem susceptibilidade de erodibilidade média, 31 % baixa e apenas 19 % elevada.

Os resultados mostram que foi possível obter, através de um modelo simplificado, um mapa de susceptibilidade à erosão hídrica para a bacia da Ribeira Seca, tendo apenas por base a geometria da paisagem (declive, perfil e traçado das vertentes) e a geologia, factores fundamentais reconhecidos localmente como condicionantes geomorfológicas de erosão hídrica. Reconhece-se, no entanto, que outros factores adicionais poderiam vir a melhorar os resultados obtidos, nomeadamente o comprimento das vertentes ou o mapa de uso do solo.

O factor exposição, frequentemente utilizado em modelos de erosão, nunca foi considerado pelos vários autores que estudaram a erosão hídrica na bacia da Ribeira Seca. Na realidade, trata-se de uma região tropical, onde a incidência dos raios solares é praticamente vertical, não permitindo contrastes evidentes de exposição entre vertentes. No entanto a exposição aos fluxos pluviogénicos, em particular os de maior intensidade que se verificam na época das chuvas, associados a massas de ar do quadrante sudoeste instáveis e de nebulosidade elevada relacionados com uma posição da Convergência Inter-tropical (CIT) sobre o arquipélago, podem indiciar a necessidade de vir a pesquisar a relevância desse factor.

BIBLIOGRAFIA

- Barry, O.; Smolikowski, B.; Roose, E. (1995) – Un projet de développement innovant au Cap Vert: le PRODAP. *Agriculture et Développement*, Montpellier, 5: 57-68.
- Bertrand, R. (1994) – *Étude des sols dans les paysages du haut bassin versant de Ribeira Seca*. CIRAD/PRODAP-FIDA/MA INIDA, Montpellier, 78p.
- Costa, F. L. (1996) – Processos erosivos actuais na bacia da Ribeira Seca (Santiago oriental – Cabo Verde). *Garcia de Orta. Série de Geografia*, Lisboa, 15 (1): 29-34.
- Costa, F. L. (2002) – *Evolução geomorfológica quaternária e dinâmica actual na bacia da Ribeira Seca (Santiago oriental - Cabo Verde)*. Lisboa, Provas para Investigador Auxiliar, 270p.
- Costa, F. L. (2004) – Contribuições para o conhecimento dos processos erosivos em Cabo Verde. *Geolnova. Revista do Departamento de Geografia e Planeamento Regional*, 15: 215-244.
- Costa, F. L. (2006) – Impactes do uso do solo nos processos erosivos e nas formas das vertentes em Cabo Verde. *Actas da 1ª Conferência Lusófona sobre o Sistema Terra (Cluster)*, Lisboa, IGBP, 4p.
- Costa, F. L. & Raposo, J. (2005) – Alterações geomorfológicas em vertentes com medidas de conservação do solo na bacia da Ribeira Seca (Santiago – Cabo Verde). *Revista de Ciências Agrárias*, 28 (1): 99-108.
- Dymond, J. R. & Harnsworth, G. R. (1994) – Towards automated land resource mapping using digital terrain models. *ITC Journal*, 2: 129-138.
- Dymond, J. R.; DeRose, R. C.; Harnsworth, G. R. (1995) – Automated mapping of land components from digital elevation data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20 (2): 131-137.
- Evans, I. S. (1980) – An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 36: 274-295.
- Faurès, J. & Morais, J. (1988) – Aplicação da Equação Universal da Perda de Solo de Wischmeier (USLE) à bacia hidrográfica de S. Jorge. *Actas do 1º Seminário Nacional de Conservação de Solos e Água*, Vila da Ribeira Grande, p. 103-114.
- Haagsma, B. (1990) – *Erosion and conservation on Santo Antão. No shortcuts to simple answers*. Ministério do Desenvolvimento Rural, Working Document of Santo Antão Rural Development Project, Ribeira Grande, nº2, 54p.

- Jenson, S. K. & Domingue, J. O. (1988) – Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11): 1593-1600.
- JIU/IICT (1975) – *Carta Geológica de Cabo Verde. Ilha de Santiago. Na escala de 1:25 000*. Junta de Investigações do Ultramar, (lev. A. Serralheiro, 1970) (folhas 52, 54 e 55), Lisboa.
- JIU/IICT (1977) – *Carta Geológica de Cabo Verde. Ilha de Santiago. Na escala de 1:100 000*. Junta de Investigações Científicas do Ultramar, Lisboa.
- Marques, M. (1984) – *Relatório técnico da missão de cooperação (5ª fase) realizada na República de Cabo Verde em Jun/Jul 1983. 1 - Ensaio de compartimentação da paisagem na bacia hidrográfica da Ribeira Seca (ilha de Santiago)*. Centro de Estudos de Pedologia, Lisboa, 50p.
- Moore, I. D.; Grayson R. B.; Landson A. R., (1991) – Digital Terrain Modelling: A review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5: 3-30.
- Roose, E. (1994) – *La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) une nouvelle méthode de lutte antiérosive testée par le projet PRODAP dans une zone semi aride montagneuse au Cap Vert (Godim, Ribeira Seca, île de Santiago)*. *Compte rendu de la mission du 17 au 29 mai 1994 en appui au PRODAP-FIDA*. S/ ed., S/ local, 18p.
- Sabino, A. (1992) – As estruturas de conservação do solo e água em Cabo Verde e a quantificação dos impactos na área do Watershed Development Project (Ilha de Santiago). In *1ª Jornadas sobre Agricultura de Cabo Verde*, Comunicações do Instituto de Investigação Científica Tropical, Série de Ciências Agrárias, Lisboa, 8: 91-124.
- SCE (1972) – *Carta Militar de Portugal. Província de Cabo Verde. Na escala de 1:25 000*. Serviço Cartográfico do Exército, 1972 (folhas 52, 54 e 55), Lisboa.
- Schmidt, J.; Evans, I. S.; Brinkmann, J. (2003) – Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical Information Science*, 17 (8): 797-814.
- Schmidt, J. & Hewitt, A. (2003) – Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry position. *Geoderma*, 121: 243-256.
- Wit, P. (1986) – *Étude pédologique de trois petits bassins-versants contigus de Fontes*. F.A.O., GCP/CVI/015/BEL, Praia, 16p.